

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2026.5125

Cd 元素对 ZL205A 微观组织和拉伸性能的影响

张子扬¹, 王松宇¹, 左强², 张明申³, 陈俊¹, 刘林翔¹, 白晓昱¹,

王志军¹, 李俊杰¹, 王锦程¹, 何峰¹

(1. 西北工业大学凝固技术全国重点实验室, 陕西西安 710072; 2. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095; 3. 西部超导材料科技股份有限公司, 陕西西安 710018)

摘要: 微合金化是提高铝合金强度的一种有效方法。然而, ZL205A 合金中最重要的微量元素 Cd 对析出强化的影响尚不完全清楚。本研究系统探讨了 Cd 元素对 ZL205A 合金微观组织与拉伸性能的影响。结果表明, Cd 微合金化使合金屈服强度显著提升约 130 MPa。微观组织分析发现, T6 态 ZL205A 合金的主要析出相为 θ'' 相, 而 Cd 元素的添加促进了 $\theta'' \rightarrow \theta'$ 相转变, 使 θ' 相成为主要析出相。这使得合金析出强化机制从位错切过 θ'' 相转变为位错绕过 θ' 相, 从而有效提升强化效果。基于 STEM-EDS 表征, 提出 Cd 通过 2 个协同机制促进相变, 即① Cd 因其较高的空位结合能, 形成具有高扩散速率的 Cd-Cu-空位簇, 为转变提供 Cu 原子; ② Cd-空位对在 θ' 相形成温度下解离并释放空位, 提高 Cu 原子在 Al 基体中的扩散速率, 从而促进 θ'' 相向 θ' 相的转变。

关键词: 微合金化; 拉伸性能; 析出相; ZL205A 合金

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2026)02-0153-09

Effect of Cd on the Microstructures and Tensile Properties of ZL205A

ZHANG Ziyang¹, WANG Songyu¹, ZUO Qiang², ZHANG Mingshen³, CHEN Jun¹, LIU Linxiang¹,
BAI Xiaoyu¹, WANG Zhijun¹, LI Junjie¹, WANG Jincheng¹, HE Feng¹

(1. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 3. Western Superconducting Technologies Co., Ltd., Xi'an 710018, China)

Abstract: Microalloying is an effective and feasible strengthening strategy for Al alloys. However, the influence of Cd, which is the most important trace element of ZL205A, on precipitation hardening is not fully understood. On this basis, the effects of Cd on the microstructure and tensile properties of the ZL205A alloy were systematically investigated. The results show that the microalloying of Cd significantly enhances the strength by ~130 MPa. Microstructure analysis indicates that the main precipitate of the T6 ZL205A alloy is the θ'' phase, and the addition of Cd element promotes the $\theta'' \rightarrow \theta'$ phase transformation, resulting in θ' becoming the dominant precipitate. This makes the alloy precipitation strengthening mechanism change from dislocation shearing through the θ'' phase to dislocation bypassing the θ' phase, thereby effectively enhancing the strengthening effect. On the basis of the STEM-EDS characterization, it is suggested that Cd promotes the $\theta'' \rightarrow \theta'$ phase transformation through two synergistic mechanisms: ① Cd has high vacancy binding energies, leading to the formation of Cd-Cu-vacancy clusters, providing Cu atoms for transformation; ② the Cd-vacancy pairs dissociate at the temperature of the θ' phase formation and release vacancies, which increases the diffusion rate of the Cu atoms in the Al matrix, thus promoting the transformation of θ'' to θ' .

Key words: microalloying; tensile properties; precipitation; ZL205A alloy

收稿日期: 2025-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(52474425); 中国科协青年人才托举工程(2023QNRC001); 中央高校基本科研业务费(G2022KY05109, G2024KY0612); 凝固技术全国重点实验室(西北工业大学)研究基金(2023-QZ-02)

作者简介: 张子扬, 2002 年生, 硕士生. 研究方向为形状记忆合金. Email: zhangzy7@mail.nwpu.edu.cn

通信作者: 何峰, 1991 年生, 博士, 教授. 研究方向为先进金属材料的强化设计与增材制造. Email: fenghe1991@nwpu.edu.cn

引用格式: 张子扬, 王松宇, 左强, 张明申, 陈俊, 刘林翔, 白晓昱, 王志军, 李俊杰, 王锦程, 何峰. Cd 元素对 ZL205A 微观组织和拉伸性能的影响[J]. 铸造技术, 2026, 47(2): 153-161.

ZHANG Z Y, WANG S Y, ZUO Q, ZHANG M S, CHEN J, LIU L X, BAI X Y, WANG Z J, LI J J, WANG J C, HE F. Effect of Cd on the microstructures and tensile properties of ZL205A[J]. Foundry Technology, 2026, 47(2): 153-161.

随着航空航天、汽车工业的快速发展,对兼具优异机械性能和低密度的结构材料提出了前所未有的需求。Al-Cu(2xxx 系列)合金因兼具低密度、优异的时效硬化能力和较强的机械性能而受到广泛关注^[1-2]。Al-Cu 合金经 T6 热处理后抗拉强度可达 406 MPa^[2]。除热处理外,微合金化也是一种有效的强化方法^[3-5]。一些研究发现,添加微量元素 Cd、Sn、In 可以显著加速 Al-Cu 合金的时效硬化效应^[6-8]。Qian 等^[9]发现,Cd 促进析出的机制因不同合金而异。在 2xxx 和 3xxx 系列等铝合金中,其主要析出形成元素在铝基体中的扩散速率相对较低,添加 Cd 可显著增强析出强化。其主导机制是析出物/弥散相在早期形成的富 Cd 纳米颗粒上形核,从而克服了低扩散速率造成的动力学限制,促进了析出物/弥散相的形成。在 6xxx 系列合金中,Cd 与溶质元素/空位之间的高结合能促进了析出相的形成。Cao 等^[10]在 Al-Si-Cu 合金中观察到了类似现象,并提出了相同的促进机制来解释该现象。

Al-Cu-Cd 合金中的析出被划分为 5 个阶段:孕育期、形核、生长、Cd 释放和粗化^[11]。Cd 具有较高的空位结合能^[12-13],在孕育期形成 Cd-Cu-空位团簇,而析出物的生长受团簇向析出物迁移的控制^[14],因此,Cd 能够促进 θ' 相的析出。此外, θ' 相析出速率的提高可能是由于 Cd 在 θ' 相/基体界面处的偏聚有效降低了界面能,从而促进了 θ' 相形核^[8]。Zhou 等^[15]在电弧增材制造(wire and arc additive manufacturing, WAAM) 制备的 205A 铝合金中观察到了相同现象。虽然现有研究一致表明,Cd 能够提高铝合金体系中 θ' 相的析出速率,但根本的促进机制在不同合金中存在差异。此外,增材制造和传统铸造工艺生产的铝合金具有不同的微观结构和机械性能。因此,该机制是否与合金成型方式相关还需要进一步研究。

在本工作中,对比研究了 ZL205A 和 Cd 改性 ZL205A 样品的微观结构和拉伸性能。阐明了 Cd 对 ZL205A 中 θ' 相析出的促进作用,并对强化机制进行了定量分析。结果表明,Cd 元素通过两种机制的协同作用提高 Cu 原子的扩散速率,促进 θ'' 相向 θ' 相的转变,使合金强度显著提升。

1 实验材料与方法

ZL205A 和其 Cd 改性合金分别命名为 ZL205A 和 ZL205A-Cd,实际化学成分如表 1 所示。两种合金均采用金属型铸造技术制备,由中国航发北京航空材料研究院提供并完成 T6 热处理。T6 热处理包括固溶处理和人工时效,完整工艺见图 1。固溶处理

表1 ZL205A合金成分
Tab.1 Alloy composition of the ZL205A alloy
(mass fraction/%)

Alloy	Cu	Mn	Ti	Cd	Zr	B	V	Al
ZL205A	4.98	0.38	0.23	-	0.14	0.015	0.22	Bal.
ZL205A-Cd	5.12	0.40	0.25	0.18	0.13	0.021	0.20	Bal.

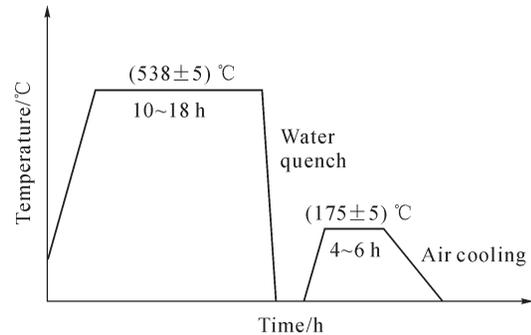


图 1 T6 热处理示意图

Fig.1 The sketch map of the T6 heat treatment

阶段,样品被置于(538±5) °C 环境中保持 10~18 h 以确保第二相完全溶解至铝基体中,随后进行快速水淬以获得过饱和固溶体。固溶处理后,样品在(175±5) °C 时效 4~6 h 以促进强化相析出,随后空冷至室温。ZL205A 中的析出序列经历 4 个不同阶段:GP 区→ θ'' → θ' → θ ^[1,3,15]。其中 θ' 相是 ZL205A 中主要的强化析出相。该相不可被剪切,位错仅能通过绕越机制通过。这有效阻碍了位错运动,从而显著提升材料强度^[11]。

利用 Talos F200X 场发射高分辨透射电镜(TEM)(加速电压 200 kV)和配备 EBSD 探测器的 TESCAN MIRA 3 扫描电镜(SEM)对合金进行微观结构分析,利用 Image J 软件统计析出相的平均长度和数量密度。晶粒尺寸采用平均线性截距法统计。采用电火花切割(EDM)加工标距尺寸为 12.5 mm×3.0 mm×2.0 mm 的狗骨状拉伸试样。单轴拉伸测试在 TSMT 力学试验平台上进行,测试条件为常温环境,拉伸应变速率为 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。

2 实验结果及讨论

2.1 拉伸性能

图 2 为经过 T6 热处理的 ZL205A 和 ZL205A-Cd 合金的工程应力-应变曲线,相应拉伸性能已定量汇总于图中。由图可知 Cd 微合金化显著提升了合金强度,屈服强度从 319 MPa 提升至 452 MPa,抗拉强度从 357 MPa 提升至 512 MPa。尽管断裂伸长率从 15.04% 降至 8.21%,但 ZL205A-Cd 合金的强度-塑性匹配仍可满足工业应用需求。

2.2 微观组织

为解释拉伸性能差异,使用 SEM 和 TEM 对 T6

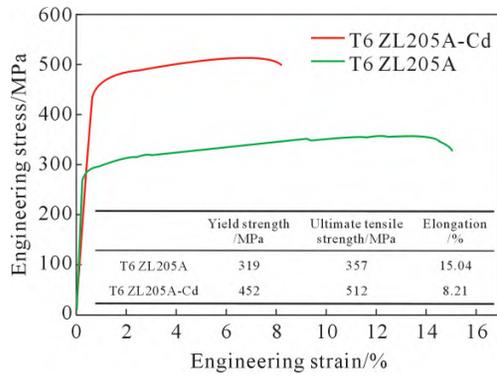


图2 T6 ZL205A 和 T6 ZL205A-Cd 合金的室温拉伸应力-应变曲线

Fig.2 Room-temperature tensile stress-strain curves of the T6 ZL205A and T6 ZL205A-Cd alloys

态 ZL205A 与 T6 态 ZL205A-Cd 合金的微观结构进行表征。如图 3 所示, T6 态 ZL205A 合金呈现等轴晶粒组织, 晶粒尺寸约为 60 μm。SEM-EDS 元素面分布分析表明(图 3c), T6 态 ZL205A 所有元素均呈均匀分布。该合金晶界处存在富 Cu、Mn 析出相, 且富

Cu 纳米颗粒分布在该析出相周围(图 4)。

对 T6 态 ZL205A-Cd 的微观组织进行分析发现, T6 态 ZL205A-Cd 合金也呈现等轴晶粒组织, 并在晶界处存在富 Cu、Mn 析出相(图 5 与 6), 晶粒尺寸约为 47 μm。Ti 元素分布呈现明显偏聚现象, 其余元素在铝基体中均匀分布无显著偏聚(图 5c)。值得注意的是, 该合金在富 Cu、Mn 区域内嵌有明亮的颗粒, 经 EDS 面扫描分析确认为富 Cd 相(图 6b)。此外, 在晶界处观察到不规则形状富 Cu 相, 同时晶粒内部存在均匀弥散的纳米级析出相(图 6a 红色框选区域)。

晶界处观测到的富 Ti 区域与反极图(IPF)中未识别区域相对应。Zhou 等^[5]在电弧增材制造 205A 合金中发现, 即便经过 T6 热处理, 大部分析出相已溶入铝基体, 但晶界处仍存在少量 Al₃Ti 相和 T 相 (Al₁₂Mn₂Cu) 颗粒, 提出 Al₃Ti 相可能会促进晶粒细化, 此观点与本研究结果一致。因此本文认为, 这些

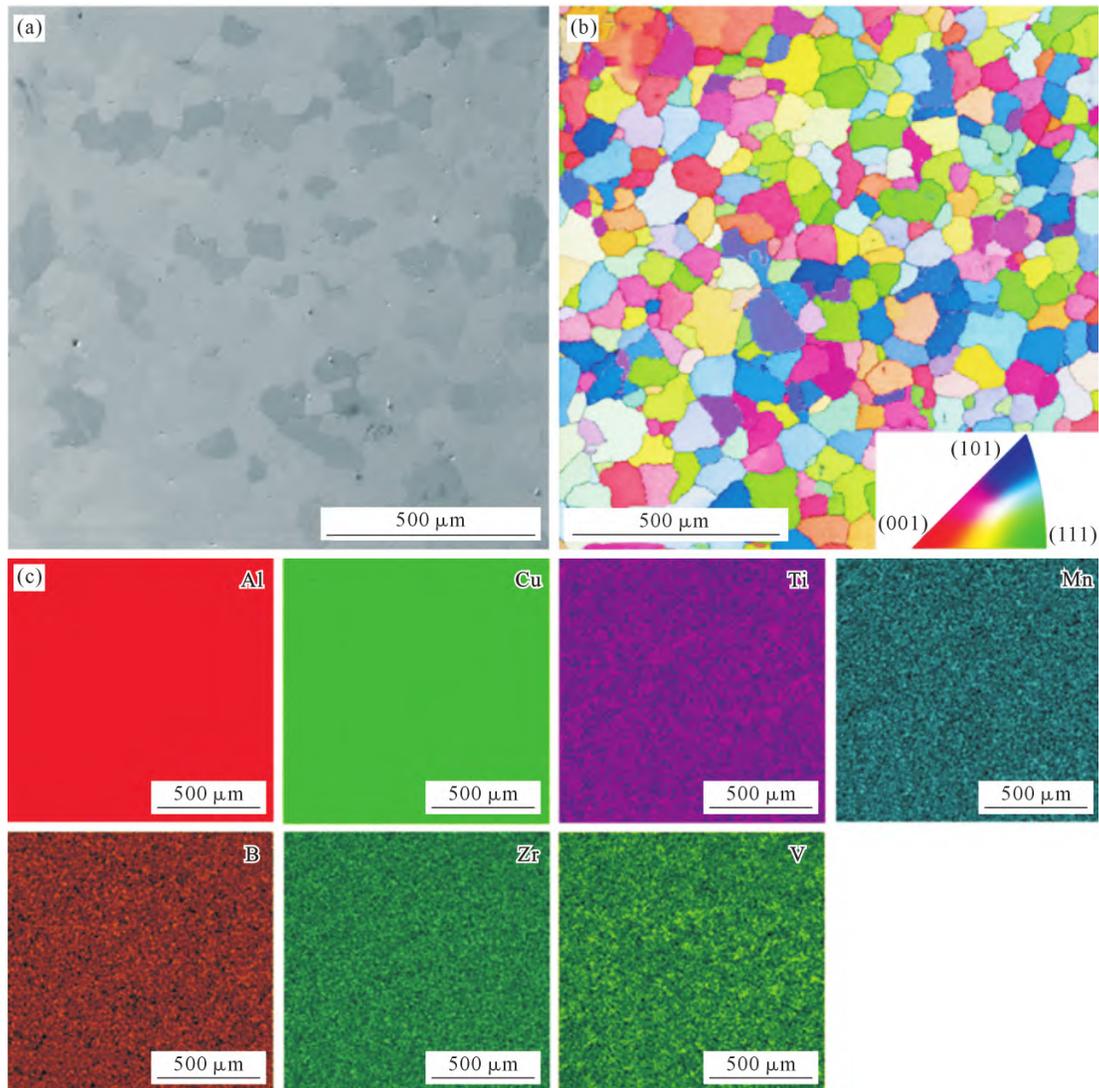


图3 T6 ZL205A 微观组织: (a) SEM 像; (b) IPF 图; (c) EDS 谱

Fig.3 Microstructure of T6 ZL205A: (a) SEM image; (b) inverse pole figure map; (c) EDS maps

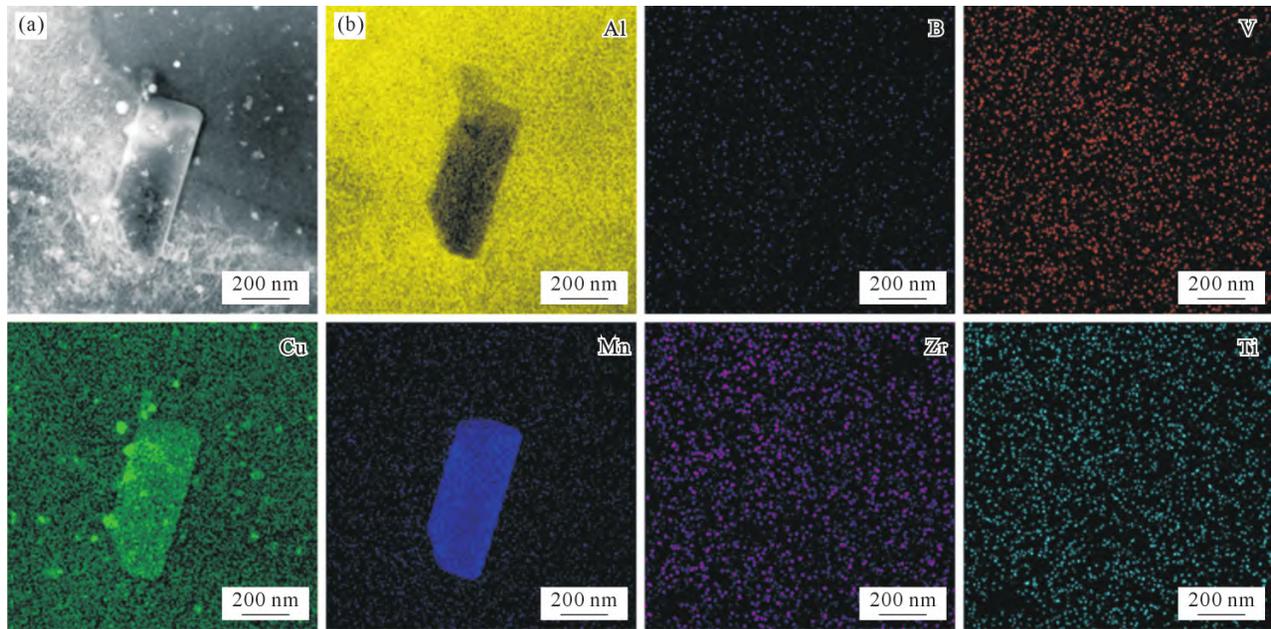


图 4 T6 ZL205A 合金晶界处析出相的形貌与元素分布:(a) TEM 像;(b) EDS 谱
Fig.4 Morphology and elemental distribution of precipitates at grain boundaries in the T6 ZL205A alloy: (a) TEM image;
(b) EDS maps

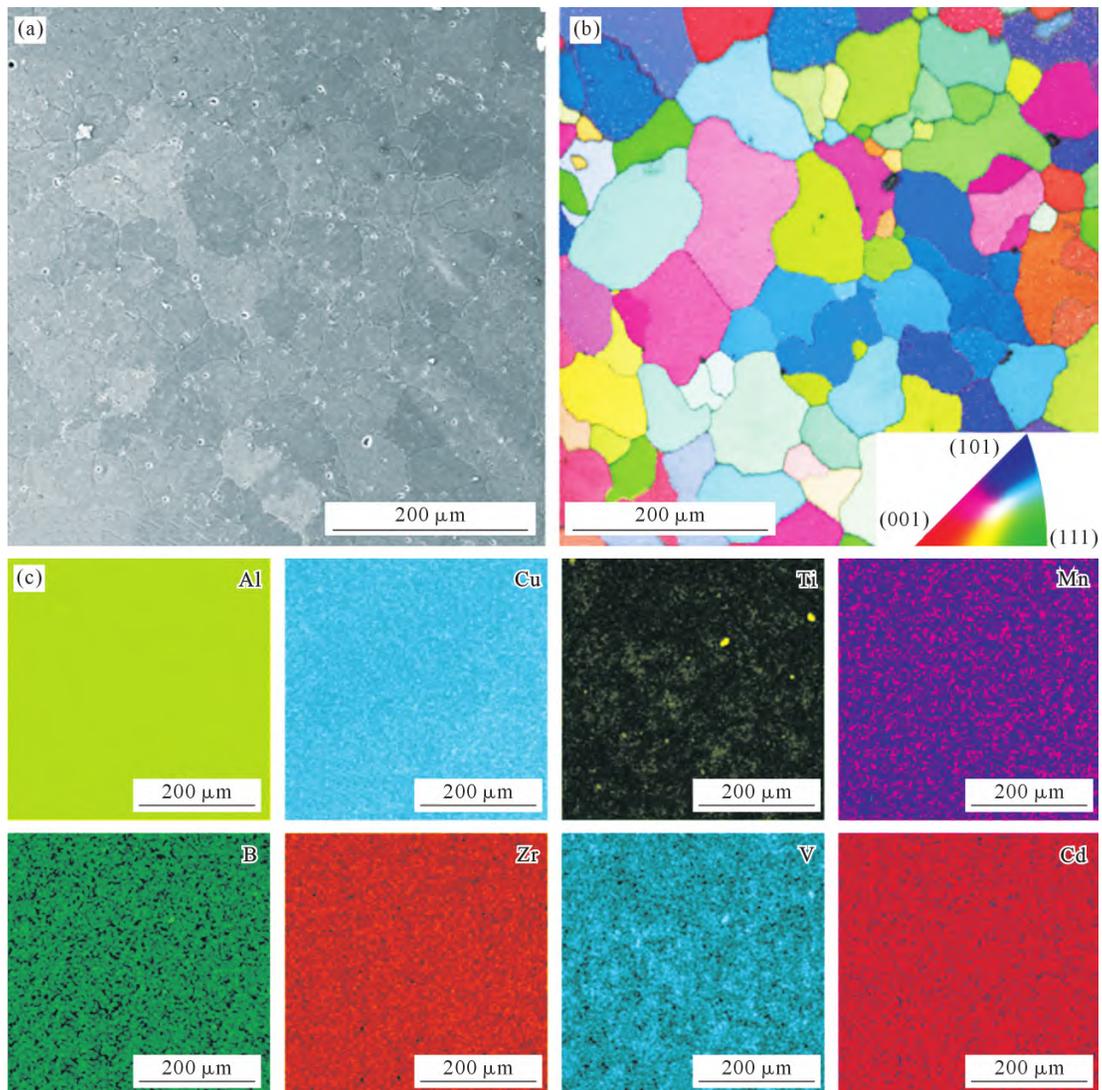


图 5 T6 ZL205A-Cd 微观组织:(a) SEM 像;(b) IPF 图;(c) EDS 谱
Fig.5 Microstructure of T6 ZL205A-Cd: (a) SEM image; (b) inverse pole figure map; (c) EDS maps

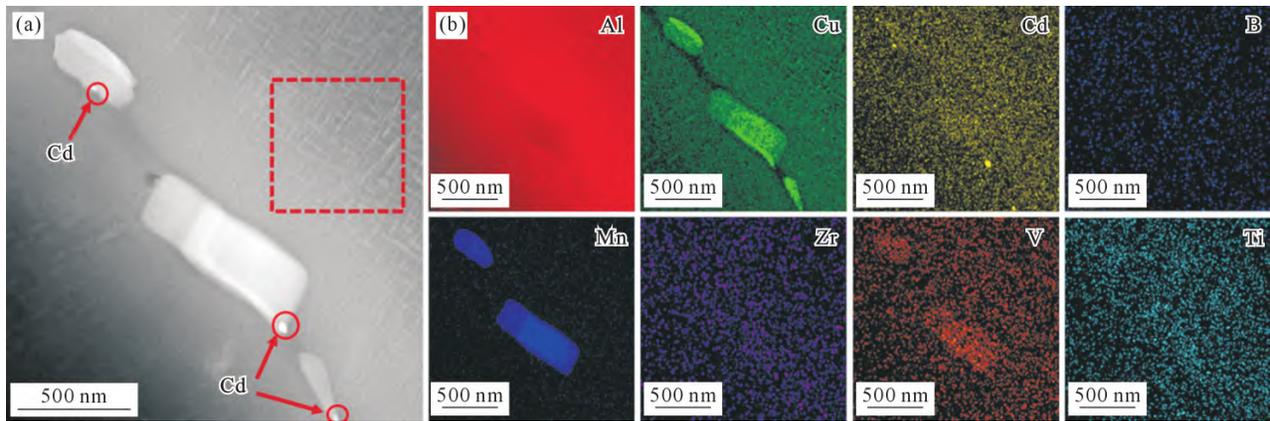


图 6 T6 ZL205A-Cd 合金晶界处析出相的形貌与元素分布:(a) TEM 像;(b) EDS 谱

Fig.6 Morphology and elemental distribution of precipitates at grain boundaries in the T6 ZL205A-Cd alloy: (a) TEM image; (b) EDS maps

富 Ti 区域代表 T6 热处理后残留的 Al_3Ti 相。两种合金间细微的晶粒尺寸差异与微量的 Al_3Ti 相,均不足以引起强度的显著提升。这表明成分不均匀性与晶粒尺寸变化均不是本研究中强度显著提高的主要原因。

采用高角环形暗场成像(HAADF)技术沿 $\langle 100 \rangle_{Al}$ 晶带轴下对两种合金的纳米级析出相进行表征。如图 7a 所示,T6 态 ZL205A 合金中分布着高密度的针状析出相。析出相定量分析表明,T6 态 ZL205A 合金中析出相的数量密度为 $2.6 \times 10^{-2} \text{ nm}^{-2}$,平均长度约 12 nm。相比之下,在 T6 态 ZL205A-Cd 合金中同样也观察到针状析出相(图 8a),但其数量密度为 $9.9 \times 10^{-4} \text{ nm}^{-2}$,平均长度约 52 nm。两种合金中析出相的数量密度和尺寸呈现明显差异。

ZL205A 合金典型时效析出序列为 GP 区 $\rightarrow \theta'' \rightarrow \theta' \rightarrow \theta^{[1,3,15]}$, θ'' 相与 θ' 相虽均呈针状,但相较于 θ'' 相(Al_3Cu), θ' 相(Al_2Cu)具有更大的尺寸及更高的 Cu 含量^[16]。通过对两种合金中的析出相 EDS 线扫描分析发现,T6 态 ZL205A-Cd 合金中析出相的 Cu 含量高于 T6 态 ZL205A 合金(图 9)。T6 态 ZL205A 合金的选区电子衍射(SAED)图谱中出现 θ'' 相的典型不连续衍射条纹(图 7c)。而 T6 态 ZL205A-Cd 合金的 SAED 图谱中出现 θ' 相特征衍射斑点(图 8c)。综合析出相的尺寸差异、Cu 含量差异量以及 SAED 结果可以确认: θ'' 相是 T6 态 ZL205A 合金的主要析出相,而 θ' 相是 T6 态 ZL205A-Cd 合金的主要析出相。

值得注意的是,在 T6 态 ZL205A-Cd 合金的 θ'' 相表面以及铝基体中均观察到球形纳米颗粒(图 8a),而该现象在 T6 态 ZL205A 合金中未被观察到。通过 EDS 面扫描分析发现这些纳米颗粒为富 Cd 相(图 8b)。由此证实 Cd 在 θ'' 相向 θ' 相转变过程中发挥关键作用。

2.3 $\theta'' \rightarrow \theta'$ 相变

图 10 展示了 Cd 元素在 $\theta'' \rightarrow \theta'$ 相变过程中的促进机制。Al-Cu 合金中 $\theta'' \rightarrow \theta'$ 相变是通过 θ'' 相内部的原子尺度重排实现的,同时伴随 θ'' 相的部分溶解以释放 Cu 原子完成相变^[17]。Cd 元素具有较高的空位结合能,表明 Cd 原子与空位之间存在强相互作用^[18]。相变过程中,Cd 原子、Cu 原子与空位通过相互吸引形成 Cu-Cd-空位团簇^[15]。这些团簇较 Cu 原子具有更高的扩散速率,可替代部分 Cu 原子扩散,为 $\theta'' \rightarrow \theta'$ 相变提供 Cu 原子,从而加速相转变。随后 Cd 原子释放,导致在 θ' 相边缘观测到富 Cd 颗粒(图 8a)。

Cu 原子的扩散遵循空位机制。现有研究表明,具有高空位结合能的元素 X(X=Sn, In)在低温下形成稳定的 X-空位对以保留空位,从而抑制 GP 区及 θ'' 相形成^[18]。而在较高温度下,X-空位对解离并促进 Cu 原子扩散^[1,18]。类似地,Cd 元素与空位也存在强相互作用。在 θ' 相形成温度下,Cd-空位对解离并释放空位以促进 Cu 原子扩散,进而加速 θ' 相形成。由于 Cd 在铝中溶解度极低^[9],这些 Cd-空位对的解离导致 Cd 颗粒在铝基体中弥散分布(图 8a)。

通过上述的双重机制,Cd 可显著提升 Cu 原子的扩散速率,因此在 T6 态 ZL205A-Cd 合金(图 6a)中未出现 T6 态 ZL205A 合金晶界附近的富 Cu 颗粒(图 4)。Cd 的添加促进了 ZL205A 合金中 $\theta'' \rightarrow \theta'$ 相变。 θ' 相的形成显著提高了析出强化效应,从而导致了屈服强度与抗拉强度显著提升。

2.4 强化机制

Al-Cu 合金的强化机制主要包括沉淀强化(σ_{ps}),晶界强化(σ_{GBS}),位错强化(σ_d),固溶强化(σ_{ss})。通常,经历塑性变形的合金中会引入位错,而热处理态未经历塑性变形,故位错强化效应可忽略不计。此外,由于 Cu 原子主要以 Al_2Cu 相形式析出^[20],其固溶强

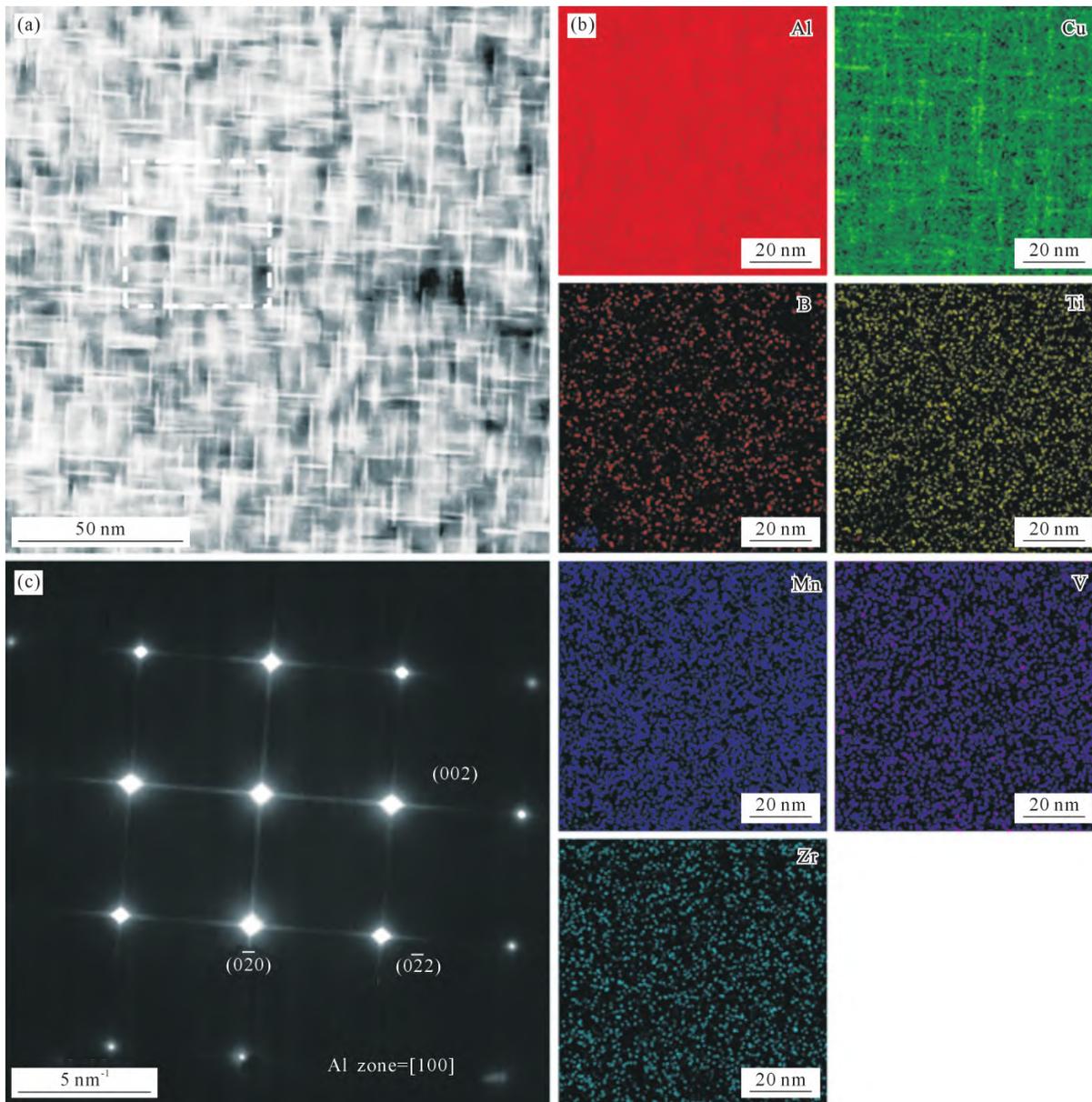


图 7 T6 ZL205A 合金析出相:(a) 沿 <100>Al 晶带轴的 HADDF 图像;(b) (a)图中所框选区域的 EDS 谱;(c) 选区电子衍射图
Fig.7 Precipitates in ZL205A subjected to T6 heat treatment: (a) HADDF image along the <100>Al zone axis; (b) EDS maps of the boxed region in (a); (c) selected area electron diffraction (SAED) pattern of the T6 ZL205A

化效应同样可以忽略。

θ' 相和 θ'' 相均对提升 Al-Cu 合金的强度具有积极作用。 θ'' (Al_3Cu)析出相具有面心四方结构,且 θ'' 相与 Al 基体之间的界面是共格的^[19]。共格界面产生的高应变场可以有效阻碍位错运动,从而达到强化效果。 θ' (Al_2Cu)析出相呈现体心四方结构,且 θ' 相与 Al 基体之间的界面是半共格的^[19-20]。通常, θ' 相是不可切割的,位错只能绕过它们。因此,相比于 θ'' 相, θ' 析出相可以更有效的阻碍位错运动^[15],对合金强度的

提升贡献也更大。

θ' 相对强度的贡献可通过式(1)计算得到^[21]。 θ'' 相可以被位错切过,其强化贡献通过切过机制计算。在切过机制中,屈服强度的增加是由位错切过析出相之前的共格强化($\Delta\sigma_{cs}$)和模量失配强化($\Delta\sigma_{ms}$),以及位错切过析出相过程中的有序强化($\Delta\sigma_{os}$)。 $\Delta\sigma_{cs}+\Delta\sigma_{ms}$ 与 $\Delta\sigma_{os}$ 两者中的较大值决定了切过机制的强化效应^[22-23]。假设切过机制主要取决于 $\Delta\sigma_{cs}+\Delta\sigma_{ms}$,其中 $\Delta\sigma_{cs}$ 和 $\Delta\sigma_{ms}$ 分别通过式(2,3)计算得到^[16,24-25,28]。

$$\sigma^{\theta'} = M \frac{0.13Gb}{2\sqrt{rh}} \left[(f_v^{\theta'})^{\frac{1}{2}} + 0.75 \left(\frac{r}{h} \right)^{\frac{1}{2}} f_v^{\theta'} + 0.14 \left(\frac{r}{h} \right) (f_v^{\theta'})^{\frac{3}{2}} \right] \ln \left(\frac{0.158r}{r_0} \right) \quad (1)$$

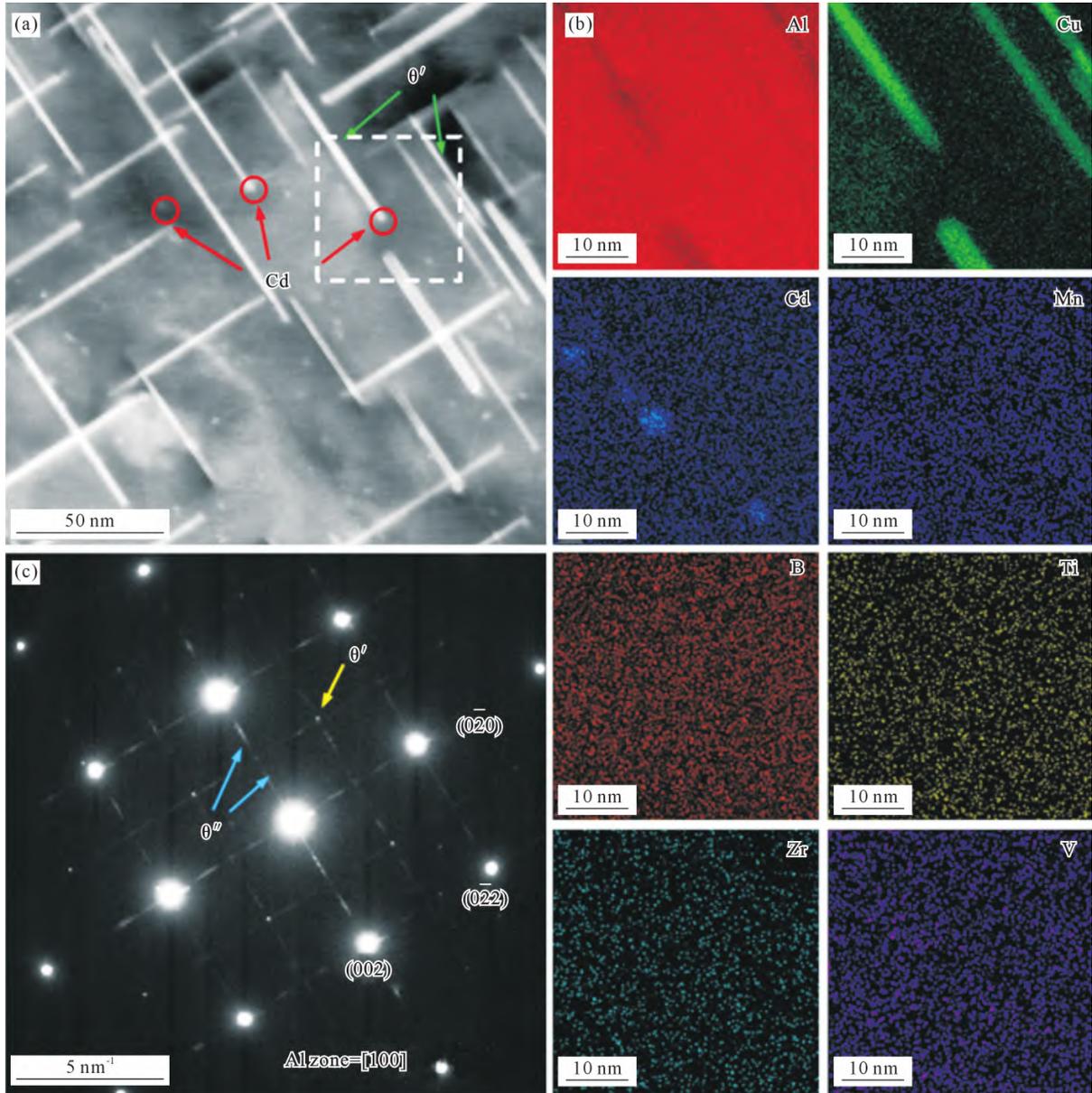


图 8 T6 ZL205A-Cd 合金析出相: (a) 沿 <100>Al 晶带轴的 HAADF 图像; (b) (a) 图中所框选区域的 EDS 图谱; (c) SAED 图像
Fig.8 Precipitates in ZL205A-Cd subjected to T6 heat treatment: (a) HAADF image along the <100>Al zone axis; (b) EDS maps of the boxed region in (a); (c) SAED pattern

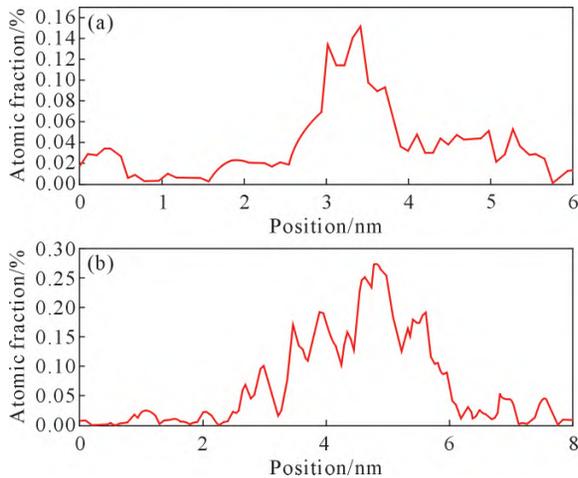


图 9 析出相 EDS 线扫描结果: (a) T6 ZL205A 合金; (b) T6 ZL205A-Cd 合金
Fig.9 EDS line scan results of the precipitates: (a) T6 ZL205A alloy; (b) T6 ZL205A-Cd alloy

$$\Delta\sigma_{cs}^{\theta''} = 4.1MG|\varepsilon|^{\frac{3}{2}} \left(\frac{f_v^{\theta'} l_{\theta''}}{2b} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$\Delta\sigma_{ms}^{\theta''} = M \frac{\Delta\mu}{4\pi\sqrt{2}} \sqrt{f_v^{\theta''}} \quad (3)$$

式中, G 为 Al 的剪切模量 (~ 26.5 GPa)^[16]; M 为面心立方(FCC)Al 基体的平均取向因子(~ 3)^[21]; b 为伯氏矢量(~ 0.286 nm), r_0 为内半径, 通常认为等于伯氏矢量^[21]; h (~ 1.8 nm)、 r (~ 26 nm) 和 $l_{\theta''}$ (~ 12 nm) 分别是 θ' 相的半厚度、半径及 θ'' 相的直径。这些数值通过对超过 85 个析出相的测量结果取平均得到。 $\Delta\mu$ 是相与基体之间的剪切模量差(4.03 GPa)^[28], ε 是晶格应变^[16]; $f_v^{\theta'}$ (0.112) 和 $f_v^{\theta''}$ (0.197) 分别是 θ' 相和 θ'' 相的体积分数。在本研究中, 将基于 TEM 图像测得析出

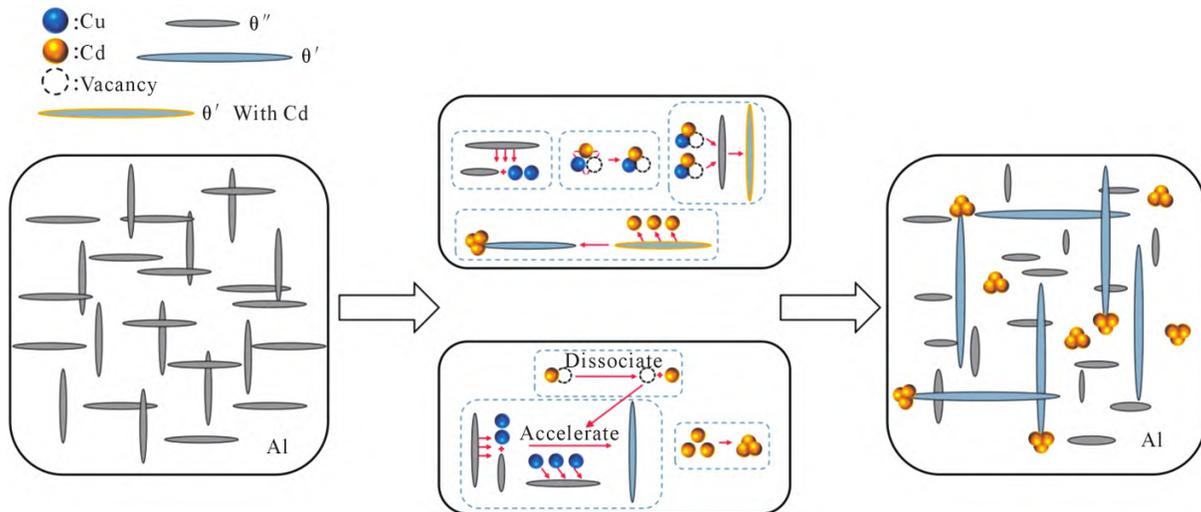


图 10 $\theta'' \rightarrow \theta'$ 相转变机制示意图

Fig.10 Schematic diagram of the $\theta'' \rightarrow \theta'$ phase transformation mechanism

相的面积分数近似代替其体积分数。经过计算, θ' 相和 θ'' 相的强化贡献分别为 420 和 331 MPa (29 MPa+302 MPa)。晶界强化对强度的贡献可通过 Hall-Petch 方程计算^[27]。

$$\Delta\sigma_{\text{CBS}} = (kd_1^{-1/2} - kd_2^{-1/2}) \quad (4)$$

式中, k 为 Hall-Petch 系数(0.13 MPa·m^{1/2})^[26]; d_1 和 d_2 分别为 T6ZL205A-Cd 和 T6 ZL205A 的平均晶粒尺寸。通过计算, 晶粒尺寸差异引起的屈服强度增量为 2 MPa。总之, 计算得到的总屈服强度增量(91 MPa) 与实验值(133 MPa) 相近, 这表明 Cd 促进 $\theta'' \rightarrow \theta'$ 相转变使阻碍位错运动的主导机制从切过机制变为绕过机制, 这是强度提升的主要原因。相比于 θ'' 相, θ' 相作为强位错障碍物, 可以更有效地阻碍位错运动。由于滑移是塑性变形的的主要方式, 晶体的滑移是通过位错的运动实现的, 位错运动的难易程度直接决定了材料发生塑性变形的难易程度。因此, Cd 微合金化在显著提高合金强度的同时, 不可避免地导致了塑性的下降。

3 结论

(1)Cd 微合金化使 ZL205A 合金的强度得到显著提高: 经 T6 热处理, ZL205A 合金的屈服强度(由 319 MPa 增至 452 MPa)和抗拉强度(由 357 MPa 增至 512 MPa)均大幅提高, 提升幅度约为 43%。

(2)ZL205A 合金的强化机制主要为析出强化, T6 态 ZL205A 合金的主要强化相为 θ'' 相, 而添加 Cd 后, 促进了 $\theta'' \rightarrow \theta'$ 相转变, 使 θ' 相成为 T6 态 ZL205A-Cd 合金的主要强化相。 θ'' 通过位错切过机制阻碍位错运动, θ' 相通常不可被位错切过, 主要通过位错绕过机制阻碍位错运动。这种阻碍位错运动机制的转变, 是合金强度显著提升的主要原因。

(3)Cd 促进作用通过两种协同机制实现: ①Cd 具有高空位结合能, 导致形成 Cd-Cu-空位团簇。这些团簇相比于 Cu 原子具有更高的扩散速度, 替代了部分 Cu 原子的扩散, 为相变提供 Cu 原子, 从而促进 $\theta'' \rightarrow \theta'$ 相转变。②Cd-空位对在 θ' 相形成温度下解离, 为 Cu 原子的扩散提供了更多空位, 从而促进 θ'' 向 θ' 的相转变。

参考文献:

- [1] WU S H, YANG C, ZHANG P, XUE H, GAO Y H, WANG Y Q, WANG R H, ZHANG J Y, LIU G, SUN J. Review of Sc microalloying effects in Al-Cu alloys[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2024, 31: 1098-1114.
- [2] JANG J H, NAM D G, PARK Y H, PARK I M. Effect of solution treatment and artificial aging on microstructure and mechanical properties of Al-Cu alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(3): 631-635.
- [3] SUN T T, GENG J W, BIAN Z Y, WU Y, WANG M L, CHEN D, MA N H, WANG H W. Enhanced thermal stability and mechanical properties of high-temperature resistant Al-Cu alloy with Zr and Mn micro-alloying[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2022, 32(1): 64-78.
- [4] MONDOL S, BANSAL U, DHANALAKSHMI P, MAKINENI S K, MANDAL A, CHATTOPADHYAY K. Enhancement of high temperature strength of Al-Cu alloys by minor alloying and hot working process[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 921: 166136.
- [5] RAKHMONOV J, LIU K, PAN L, BRETON F, CHEN X G. Enhanced mechanical properties of high-temperature-resistant Al-Cu cast alloy by microalloying with Mg[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 827: 154305.
- [6] SILCOCK J M, FLOWER H M. Comments on a comparison of early and recent work on the effect of trace additions of Cd, In, or Sn on nucleation and growth of θ' in Al-Cu alloys [J]. Scripta Materialia, 2002, 46(5): 389-394.

- [7] RINGER S P, HONO K, SAKURAI T. The effect of trace additions of Sn on precipitation in Al-Cu alloys: An atom probe field ion microscopy study[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1995, 26: 2207-2217.
- [8] NUYTEN J B M. Quenched structures and precipitation in Al-Cu alloys with and without trace additions of Cd[J]. *Acta Metallurgica*, 1967, 15(11): 1765-1770.
- [9] QIAN F, LI J Y, ZHAO D D, JIN S B, MORTSELL E A, LI Y J. Comparative study of Cd addition effects on precipitation in different aluminium alloys[J]. *Materials Science and Technology*, 2023, 39(16): 2469-2477.
- [10] CAO Y D, CHEN X H, WANG Z D, CHEN K X, TANG W Z, PAN S W, YANG X H, QIN J W, LI S H, WANG Y L. Effect of Cd micro-addition on microstructure and mechanical properties in ternary Al-Si-Cu alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 851: 156739.
- [11] HU Y S, WANG G, YE M, WANG S Q, WANG L P, RONG Y M. A precipitation hardening model for Al-Cu-Cd alloys[J]. *Materials & Design*, 2018, 151(5): 123-132.
- [12] SHIN D, SHYAM A, LEE S, YAMAMOTO Y, HAYNES J A. Solute segregation at the Al/ θ' -Al₂Cu interface in Al-Cu alloys[J]. *Acta Materialia*, 2017, 141: 327-340.
- [13] WOLVERTON C. Solute-vacancy binding in aluminum[J]. *Acta Materialia*, 2007, 55(17): 5867-5872.
- [14] NOBLE B. Theta-prime precipitation in aluminium-copper-cadmium alloys[J]. *Acta Metallurgica*, 1968, 16(3): 393-401.
- [15] ZHOU S Y, WU K, YANG G, WU B, QIN L Y, WU H, YANG C Y. Microstructure and mechanical properties of wire arc additively manufactured 205A high strength aluminum alloy: The comparison of as-deposited and T6 heat-treated samples[J]. *Materials Characterization*, 2022, 189: 111990.
- [16] BANSAL U, SINGH M P, SINHA S K, SAHU D K, MONDOL S, MAKINENI S K, PAUL A, CHATTOPADHYAY K. Strength and stability through variable micro segregation behaviour of Ta and Zr solutes at intermetallic interfaces in Al-Cu alloys[J]. *Acta Materialia*, 2023, 259: 119254.
- [17] SHEN Z J, DING Q Q, LIU C H, WANG J W, TIAN H, LI J X, ZHANG Z. Atomic-scale mechanism of the $\theta'' \rightarrow \theta'$ phase transformation in Al-Cu alloys[J]. *Journal of Materials Science and Technology*, 2017, 33(10): 1159-1164.
- [18] ELSAYED M, STAAB T E M, CÍZEK J, KRAUSE-REHBERG R. On the interaction of solute atoms with vacancies in diluted Al-alloys: A paradigmatic experimental and ab-initio study on indium and tin[J]. *Acta Materialia*, 2021 219: 117228.
- [19] LIU H, PAPANITRIOU I, LIN F X, LLORCA J. Precipitation during high temperature aging of Al-Cu alloys: A multiscale analysis based on first principles calculations[J]. *Acta Materialia*, 2019, 167(1): 121-135.
- [20] GAO L, LI K, NI S, DU Y, SONG M. The growth mechanisms of θ' precipitate phase in an Al-Cu alloy during aging treatment[J]. *Journal of Materials Science and Technology*, 2021, 61(20): 25-32.
- [21] WANG Z H, GAO Y F, HUANG J L, WU C D, WANG G L, LIU J. Precipitation phenomena and strengthening mechanism of Al-Cu alloys deposited by in-situ rolled wire-arc additive manufacturing [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 855: 143770.
- [22] MA K K, WEN H M, HU T, TOPPING T D, ISHEIM D, SEIDMAN D N, LAVERNIA E J, SCHOENUNG J M. Mechanical behavior and strengthening mechanisms in ultrafine grain precipitation-strengthened aluminum alloy [J]. *Acta Materialia*, 2014, 62: 141-155.
- [23] WEN H M, TOPPING T D, ISHEIM D, SEIDMAN D N, LAVERNIA E J. Strengthening mechanisms in a high-strength bulk nanostructured Cu-Zn-Al alloy processed via cryomilling and spark plasma sintering[J]. *Acta Materialia*, 2013, 61(8): 2769-2782.
- [24] WANG J, LIU Z Y, BAI S, CAO J, ZHAO J G, LUO L, LI J L. Microstructure evolution and mechanical properties of the electron-beam welded joints of cast Al-Cu-Mg-Ag alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 801: 140363.
- [25] 陈军洲, 吕良星, 甄良, 戴圣龙. AA 7055 铝合金时效析出强化模型[J]. *金属学报*, 2021, 57(3): 353-362.
- CHEN J Z, LYU L X, ZHEN L, DAI S L. Precipitation strengthening model of AA 7055 aluminium alloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2021, 57(3): 353-362.
- [26] LIU H J, CAI Z Y, FENG Y, WANG M. Microstructure and mechanical properties of wire arc additive manufactured ZL205A alloy[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 26: 5321-5336.
- [27] MONDOL S, MAKINENI S K, KUMAR S, CHATTOPADHYAY K. Enhancement of high temperature strength of 2219 alloys through small additions of Nb and Zr and a novel heat treatment [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2018, 49: 3047-3057.
- [28] 宋转转, 尹登峰, 王华, 谢凯文, 徐庆. Cu 含量及热处理对 Al-Cu-Mn 合金显微组织及力学性能的影响[J]. *矿冶工程*, 2024, 44(6): 156-162.
- SONG Z Z, YIN D F, WANG H, XIE K W, XU Q. Effect of Cu content and heat treatment on microstructure and mechanical properties of Al-Cu-Mn alloys[J]. *Mining Metallurgical Engineering*, 2024, 44(6): 156-162.

(责任编辑:李亚敏)